

05;11;12

Особенности микромагнитных структур в аморфных FeCuNbSiB сплавах

© Е.Е. Шалыгина, Л.М. Бекоева, А.Н. Шалыгин

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

Поступило в Редакцию 15 июля 1998 г.

Представлены результаты магнитооптического исследования приповерхностной микромагнитной структуры FeCuNbSiB лент в исходном состоянии и отожженных при температуре 550°C в течение 1 h. В исходном состоянии образцы были аморфными, а после отжига имели нанокристаллическую структуру с типичными размерами зерна, равными 10–12 nm. Обнаружено, что в изучаемых образцах существует дисперсия магнитной анизотропии, обуславливающая неоднородность их локальных магнитных свойств. Найдено, что линейный размер магнитных неоднородностей в исходном и отожженном образцах равен 120–150 и 50–70 μm соответственно.

В 1988 г. появилось первое сообщение о новом классе сплавов на основе железа, проявляющих уникальные магнитные свойства (в частности, низкие гистерезисные потери, высокую проницаемость, почти нулевую магнитострикцию) [1]. Сплав имел следующий состав: Fe_{73.5}Cu₁Nb₃Si_{13.5}B₉. Материал был получен методом закалки из расплава в виде аморфной ленты. После последующей термообработки при температуре выше температуры кристаллизации этот материал имел нанокристаллическую структуру с размером зерна \sim 10–15 nm и обладал сверхмагнитомягкими свойствами [2]. Изучение корреляции между структурными и магнитными свойствами FeCuNbSiB сплавов в исходном состоянии и после отжига привлекло внимание исследователей. Однако нужно отметить, что стандартные методы позволяют измерять объемные магнитные свойства магнетиков. Вместе с тем известно [3], что приповерхностные магнитные свойства аморфных материалов могут оказывать сильное влияние на их объемные магнитные характеристики.

В данной работе мы представляем результаты магнитооптического исследования приповерхностной микромагнитной структуры Fe_{76.5}Cu₁Nb₃Si_{13.5}B₆ лент в исходном состоянии и после отжига при температуре 550°C в течение 1 h.

$\text{Fe}_{76.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_6$ сплав был приготовлен методом закалки из расплава в виде аморфных лент шириной 10 мм и толщиной 20 μm . В исходном состоянии ленты были рентгено-аморфными, а после отжига при 550°C в течение 1 h имели нанокристаллическую структуру с размером зерна $\sim 10\text{--}12\text{ nm}$. Нанокристаллиты находились в остаточной аморфной матрице, занимающей примерно 20% от полного объема. Ленты были разрезаны на кусочки длиной 15 мм. Изучение микромагнитной структуры лент было выполнено на магнитооптическом микромагнитометре, имеющем приповерхностную чувствительность (глубину проникновения) $\sim 10\text{ nm}$ и пространственное разрешение вплоть до 0.3 μm [4]. Все приведенные ниже результаты были получены с помощью экваториального эффекта Керра δ . В этом случае внешнее магнитное поле H прикладывается параллельно поверхности образца и перпендикулярно плоскости падения света. Распределения намагниченности $\delta(L)/\delta_s \sim M(L)/M_s$ и локальные гистерезисные характеристики $\delta(H)/\delta_s \sim M(H)/M_s$ были измерены на обеих сторонах (контактной и свободной) ленточных образцов. Здесь δ_s равно величине δ при $M = M_s$; M_s — намагниченность насыщения, L — координата вдоль длины образца. Ошибка измерения δ не превышала 5%.

На рис. 1, *a* приведены типичные локальные кривые намагничивания, измеренные на различных участках контактной стороны исходного образца в магнитном поле H , приложенном последовательно параллельно и перпендикулярно длине ленты L (сплошные и пунктирные кривые соответственно). Диаметр светового пятна D на поверхности образца в этом случае был равен 1 мм. Локальные петли гистерезиса были измерены так же. Типичная локальная петля гистерезиса представлена на вставке рис. 1, *a*. Рис. 1, *b* показывает типичные локальные кривые намагничивания, полученные на том же образце в поле H , параллельном L , при $D = 20\text{ }\mu\text{m}$. Типичные распределения намагниченности в поле $H = 1$ и 2 кА/м приведены на рис. 2, *a*. В этом случае смещение светового пятна ($D = 20\text{ }\mu\text{m}$) осуществлялось вдоль центральной линии по длине образца. Очевидно, что набор таких кривых позволяет получить топографию плоскостных компонент намагниченности и, таким образом, иметь информацию о приповерхностной микромагнитной структуре ленты. Рис. 1, *c* показывает типичные локальные кривые намагничивания, измеренные на контактной стороне отожженного образца в поле H , приложенном последовательно параллельно и перпендикулярно длине ленты (сплошные и пунктирные кривые соответственно). Диаметр све-

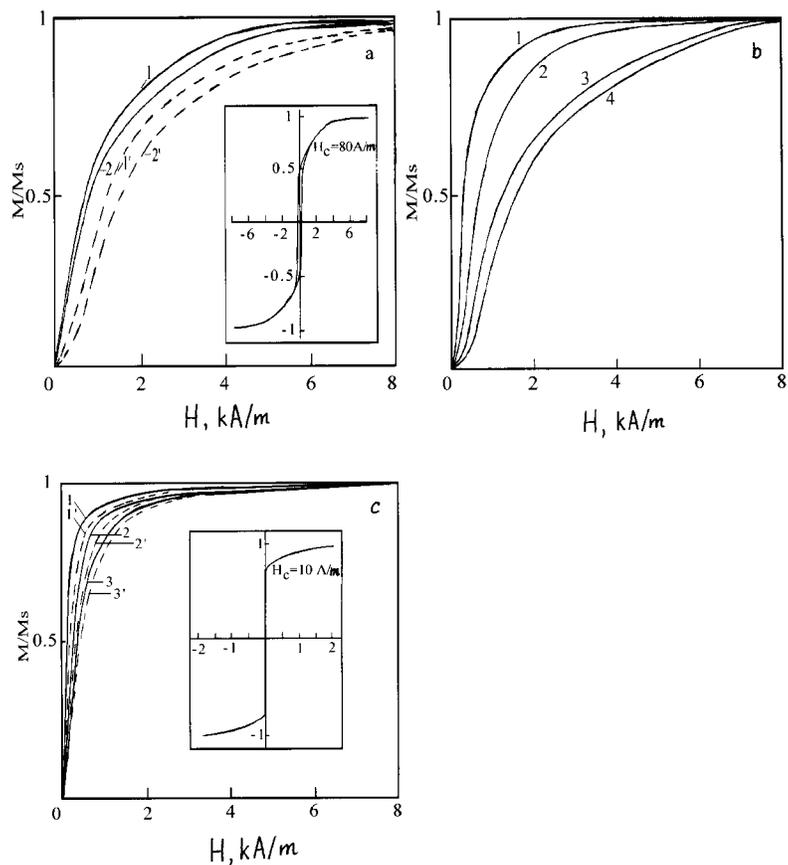


Рис. 1. Типичные локальные кривые намагничивания FeCuNbSiB аморфной ленты в исходном (a, b) и отожженном (c) состоянии в поле H , приложенном параллельно (сплошные линии) и перпендикулярно (пунктирные линии) длине образца. На вставках приведены типичные локальные петли гистерезиса. Диаметр D светового пятна на образце был равен 1 mm (a) и 20 μm (b, c).

тогового пятна D на поверхности образца в этом случае был равен 20 μm . Типичная локальная петля гистерезиса представлена на вставке рис. 2, c. Типичные распределения намагниченности, полученные на отожженном

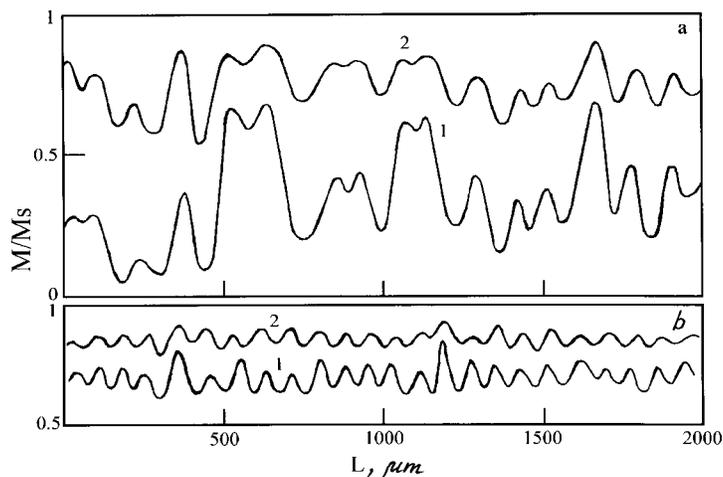


Рис. 2. Типичные распределения намагниченности для исходного образца при $H = 1$ и 2 kA/m (*a*) и для отожженного образца при $H = 0.5$ и 1 kA/m (*b*) (кривые 1 и 2 соответственно) ($D = 20 \mu\text{m}$).

образце при $H = 0.5$ и 1 kA/m , приведены на рис. 2, *b*. Аналогичные измерения были выполнены на свободной стороне изучаемых образцов.

Анализ полученных данных позволил сделать следующие выводы. Кривые намагничивания исходного образца в поле H , параллельном и перпендикулярном длине ленты, различаются, что можно объяснить наличием плоскостной магнитной анизотропии (МА). Легкая ось намагничивания параллельна длине ленты L . Вид локальных кривых намагничивания при переходе от одного участка к другому (как при $D = 1 \text{ mm}$, так и при $D = 20 \mu\text{m}$) сильно изменяется (рис. 1, *a, b*), при этом кривые распределения намагниченности имеют нерегулярный характер (рис. 2, *a*). Эти данные свидетельствуют о неоднородности локальных приповерхностных магнитных свойств исходного образца как в макро-, так и в микромасштабе, что может быть обусловлено дисперсией МА. Из рисунка 2, *a* видно, что линейный размер магнитных неоднородностей равен $120\text{--}150 \mu\text{m}$. Было установлено, что в исходном образце локальные значения поля насыщения и коэрцитивной силы H_c сильно различаются. В частности, минимальное и максимальное

значения H_C равны 0.08 и 0.2 кА/м. Следует отметить, что при проведении аналогичных измерений на свободной стороне ленты мы наблюдали существенное изменение значений H_C по сравнению с H_C на контактной стороне. Оказалось, что H_C на свободной стороне примерно в 2 раза меньше, чем на контактной. Кроме того, было установлено, что H_C на поверхности лент больше (\sim в 6–8 раз), чем объемное значение H_C . Первый факт, вероятно, можно объяснить различием морфологии контактной и свободной сторон ленты, а второй — существованием дефектов (шероховатость поверхности, микрокристаллиты), типичных для поверхностных слоев материалов, полученных методом закалки из расплава.

Кривые намагничивания отожженного образца в поле H , параллельном и перпендикулярном длине ленты, отличаются незначительно, что свидетельствует об уменьшении плоскостной МА (рис. 2, *c*). Различие локальных кривых намагничивания даже при $D = 20 \mu\text{m}$ также заметно уменьшается. Из рисунка 2, *b* видно, что линейный размер магнитных неоднородностей в этом образце равен 50–70 μm . Было обнаружено, что коэрцитивная сила в отожженном образце уменьшается примерно в 10 раз по сравнению с H_C в исходном образце, при этом различие локальных значений H_C не превышает 20%. Наконец, сравнение кривых намагничивания на рис. 1, *a* и 1, *c* показывает, что начальная магнитная проницаемость отожженного образца выше (\sim в 5 раз), чем начальная магнитная проницаемость исходного образца.

Итак, магнитооптические исследования микромагнитной структуры $\text{Fe}_{6.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_6$ аморфных лент, имеющих после отжига нанокристаллическую структуру с размерами зерна, равными 10–12 nm, показали, что в изучаемом материале существует дисперсия магнитной анизотропии в макро- и микромасштабе, обуславливающая неоднородность локальных магнитных свойств. Обнаружено, что после термообработки лент линейный размер магнитных неоднородностей уменьшается \sim в 2 раза, при этом локальные значения коэрцитивной силы уменьшаются (\sim в 10 раз), а начальная магнитная проницаемость увеличивается (\sim в 5 раз) по сравнению с аналогичными характеристиками исходного образца. Установлено, что в отожженном образце различие локальных магнитных свойств не превышает 20%. Таким образом, мы обнаружили сильное влияние структуры изучаемого аморфного материала на его локальные приповерхностные магнитные свойства.

Список литературы

- [1] *Yoshizawa Y., Oguma S., Yamauchi K.* // J. Appl. Phys. 1988. Т. 64. С. 6044–6046.
- [2] *Herzer G.* // IEEE Trans. Magn. 1989. Т. 25. С. 3327–3329; 1990. Т. 26. С. 1397–1402; *Herzer G.* // Physica Scripta. 1993. Т. 49. С. 307–314.
- [3] *Кринчик Г.С., Чепурова (Шалыгина) Е.Е., Ахматова О.П.* и др. // ФТТ. 1987. Т. 28. С. 2862–2865.
- [4] *Кринчик Г.С., Чепурова Е.Е., Штайн А.В.* // ЖЭТФ. 1984. Т. 87. С. 2014–2023.